

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES ÍNDICES DE SEQUÍA PARA APLICACIONES ECOLÓGICAS, AGRÍCOLAS E HIDROLÓGICAS

Sergio M. VICENTE-SERRANO¹, Santiago BEGUERÍA², Jorge LORENZO-LACRUZ¹, Jesús Julio CAMARERO³, Juan I. LÓPEZ-MORENO¹, César AZORÍN-MOLINA¹, Jesús REVUELTO¹, Enrique

MORÁN-TEJEDA¹, Arturo SÁNCHEZ-LORENZO⁴

¹*Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

²*Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

³*ARAIID-Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

⁴*Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich*

svicen@ipe.csic.es, sbegueria@eead.csic.es, jlorenzo@ipe.csic.es, jjcamarero@ipe.csic.es,
nlopez@ipe.csic.es, cazorin@ipe.csic.es, jrevuelto@ipe.csic.es, emoran@usal.es

RESUMEN

En este estudio se lleva cabo una evaluación global de diferentes índices de sequía para la cuantificación de los impactos en caudales, humedad del suelo, crecimiento de los bosques y rendimiento de los cultivos. Para ello, se compara el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI), cuatro versiones del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI). Se ha comprobado que el SPEI y el SPI, que permiten calcularse a diferentes escalas temporales, aportan mejores resultados que los diferentes índices de Palmer para explicar los impactos de la sequía. Existen pequeñas diferencias entre el SPI y el SPEI, pero el SPEI muestra, en general, mejores correlaciones con las diferentes variables durante el periodo estival, momento en el que se registran los principales impactos de las sequías y cuando el seguimiento de las mismas resulta crítico.

Palabras clave: Índice de sequía, vulnerabilidad a la sequía, sequías agrícolas, dendrocronología, sequías hidrológicas, SPEI, SPI, PDSI.

ABSTRACT

In this study we provide a global assessment of the performance of different drought indices for monitoring drought impacts to streamflows, soil moisture, forest growth and crop yields. For this purpose, we compare the Standardized Precipitation Index (SPI), four versions of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). We have found a higher capability of the SPEI and the SPI drought indices, which are calculated on different time-scales, than the Palmer indices to explain the drought impacts. We have found small differences in the performance of the SPI and the SPEI indices, but the SPEI has been the drought index that records the best correlations between drought and the response variables in summer, the season in which more drought-related impacts are recorded and in which drought monitoring is critical.

Key words: Drought index, drought vulnerability, agricultural droughts, dendrochronology, hydrological droughts, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Standardized Precipitation Index, Palmer Drought Severity Index.

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los fenómenos climáticos más complejos que afectan a la sociedad y el medio ambiente (Wilhite, 1993). Esta complejidad se debe a la dificultad de cuantificar la severidad de una sequía, pues habitualmente identificamos una sequía por sus efectos sobre diferentes sistemas (agricultura, recursos hídricos, ecología, incendios forestales, pérdidas económicas, etc.), pero no existe una variable física determinada que nos permita medir la severidad de la sequía. Por ello, las sequías son difíciles de identificar en el tiempo y el espacio, siendo muy complejo determinar el momento en que una sequía comienza y termina, además de cuantificar su duración, magnitud y extensión superficial (Burton *et al.*, 1978; Wilhite, 2000).

Estas características explican el enorme esfuerzo científico dedicado a desarrollar herramientas que proporcionen una evaluación objetiva y cuantitativa de la gravedad de la sequía. La sequía se cuantifica habitualmente mediante los llamados índices de sequía, que son indicadores indirectos basados en información climática. Diferentes estudios han mostrado la relación existente entre la variabilidad de los índices de sequía y diferentes variables ambientales e hidrológicas como el crecimiento de los bosques (Pasho *et al.*, 2011), el caudal de los ríos (Vicente Serrano y López-Moreno, 2005), el nivel de aguas subterráneas (Fiorillo y Guadagno, 2010), la producción de cultivos (Vicente-Serrano *et al.*, 2006), la actividad de la vegetación (Vicente-Serrano, 2007), la frecuencia de los incendios forestales (Drobyshev *et al.*, 2012), etc. Además, los índices de sequía, también se utilizan para monitorizar las condiciones de sequía en tiempo real (Svoboda *et al.*, 2002), aspecto crucial para la implementación de planes de mitigación de las sequías.

Hay trabajos recientes que llevan a cabo una revisión de los indicadores de sequía existentes (Heim, 2002; Mishra y Singh, 2010), pero hay muy pocos estudios que realicen comparaciones estadísticas entre diferentes índices y establezcan recomendaciones sobre el uso de uno de ellos sobre la base de criterios objetivos (Guttman, 1998; Quiring, 2009; Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 2011). Además, existen escasos estudios que hayan comparado la capacidad de los diferentes índices de sequía para identificar impactos en diferentes sistemas (Zhai *et al.*, 2010; Quiring y Ganesh, 2010). Los resultados de estos estudios son muy heterogéneos, ya que el mejor índice de sequía varía en función del sistema analizado e incluso hay variaciones espaciales. Por ello, en la actualidad existe una cierta confusión entre científicos, gestores y usuarios finales al elegir un índice de sequía concreto para un propósito específico.

En este estudio se proporciona una evaluación global de la capacidad de diferentes índices de sequía para el seguimiento de los impactos de la sequía en los caudales, humedad del suelo, crecimiento de los bosques y rendimiento de los cultivos. Para ello, comparamos los dos índices más utilizados en la actualidad: el Índice de Precipitación Estandarizado, SPI (McKee *et al.*, 1993), y cuatro versiones del Índice de Severidad de Sequía de Palmer, PDSI (Palmer, 1965). Además, también incluimos el recientemente desarrollado Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración, SPEI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

2. FUENTES DE INFORMACIÓN Y MÉTODOS

2.1. Los índices de sequía

2.1.a. LOS ÍNDICES DE PALMER

El PDSI constituyó un hito en el desarrollo de los índices de sequía. Aunque el PDSI presenta numerosas deficiencias (Vicente-Serrano *et al.*, 2011), sigue siendo uno de los más utilizados en la

actualidad. El PDSI se calcula mediante datos de temperatura y precipitación y el procedimiento de cálculo completo puede ser consultado en diferentes publicaciones (Karl, 1986). Del PDSI se han planteado índices derivados, así como algunas modificaciones. Por ejemplo, el WPLM (Heddinghaus Sabol y 1991), modifica las reglas originales de acumulación durante los períodos húmedos y secos. Igualmente, el índice Hidrológico de Sequía de Palmer (PHDI) se derivó del PDSI para cuantificar el impacto a largo plazo de las sequías con aplicaciones hidrológicas. Por último, el índice Z también se deriva del modelo de Palmer, y resulta mucho más sensible que el PDSI a las deficiencias de humedad a corto plazo. Uno de los principales problemas de los índices de Palmer es que los parámetros necesarios para su cálculo se obtuvieron empíricamente en zonas de EE.UU., lo que limita su uso en otras regiones (Akimremi et al., 1996). Este problema fue resuelto con el desarrollo de los índices de Palmer auto-calibrados (Wells *et al.*, 2004), que son espacialmente comparables. Por lo tanto, en este estudio se han utilizado dichas versiones auto-calibradas de los cuatro índices de Palmer.

2.1.b. EL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (SPI)

El Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) fue propuesto por McKee *et al.* (1993). Este índice consiste en la conversión de los datos de precipitación a probabilidades basadas en registros de precipitación a largo plazo. Las probabilidades se transforman en series normalizadas con un promedio de 0 y una desviación estándar de 1. La principal ventaja del SPI con relación a los índices del Palmer es que permite el análisis de los impactos de las sequías a distintas escalas temporales (Edwards y McKee, 1997), además de la identificación de diferentes tipos de sequía, ya que diferentes sistemas naturales y sectores económicos pueden responder a las condiciones de sequía en escalas de tiempo muy diferentes (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2005; Vicente-Serrano *et al.*, 2011; Vicente-Serrano, 2007; Pasho *et al.*, 2011). McKee *et al.* (1993) utilizaron la distribución Gamma para transformar las series de precipitación a unidades estandarizadas. Sin embargo, la distribución tipo III de Pearson muestra una mejor capacidad de adaptación a las series de precipitación computadas a diferentes escalas temporales (Guttman, 1999; Vicente-Serrano, 2006; Quiring, 2009). Aquí hemos utilizado el algoritmo descrito por Vicente-Serrano (2006) para el cálculo del SPI a escalas temporales de 1 a 48 meses.

2.1.c. EL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTANDARIZADO (SPEI)

La principal crítica que se hace al SPI es que su cálculo se basa únicamente en datos de precipitación. El índice no considera otras variables que pueden influir en las condiciones de sequía. El SPI se basa en dos asunciones: i) la variabilidad de la precipitación es mucho mayor que la de otras variables, como la temperatura y la evapotranspiración potencial (ETP), y ii) las otras variables son estacionarias (es decir, no tienen tendencia temporal). En este escenario la importancia de estas variables es insignificante, y las sequías quedan determinadas, principalmente, por la variabilidad temporal de la precipitación. Sin embargo, el impacto del proceso de calentamiento está siendo evidente en recientes estudios que analizan los impactos de la sequía (p. ej., Vicente-Serrano *et al.* 2010b). Por lo tanto, el uso de índices de sequía que incluyen datos de temperatura en su formulación (por ejemplo, el PDSI) para identificar impactos de la sequía en diferentes sistemas ecológicos, hidrológicos y agrícolas. Sin embargo, el PDSI carece del carácter multiescalar esencial para la evaluación de la sequía en los distintos sistemas, y también para diferenciar entre tipos de sequía. El SPEI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), basado en registros de precipitación y evapotranspiración

potencial, combina la sensibilidad del PDSI a los cambios en la demanda de evaporación, con la sencillez de cálculo y la naturaleza multi-temporal del SPI.

2.2. Bases de datos

Los seis índices de sequía (PDSI, PHDI, WPLM, el índice Z, SPI y SPEI) se calcularon a nivel mundial a partir de la base de datos CRU TS3.1 (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/>), que cubre el período 1901-2009 con una resolución espacial de 0.5°. Para obtener el SPI y el SPEI se utilizaron datos de precipitación y temperatura media mensual. Además, para calcular los diferentes índices de Palmer se utilizó información sobre la capacidad de campo del suelo, que se obtuvo de <http://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Webb.html>.

Para determinar la capacidad de los diferentes índices de sequía en la identificación de impactos, hemos utilizado los datos globales de cuatro variables. Por un lado, datos mensuales de caudal (1945-2004) en 151 cuencas hidrográficas en todo el mundo (Dai *et al.*, 2009) (Figura 1a). A partir de los registros mensuales de caudal se obtuvo un índice de sequía hidrológico, el Índice Estandarizado de caudales (SSI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2012), que permite la comparación temporal y espacial entre los datos de caudal independiente de los regímenes de los ríos y las magnitudes de caudal.

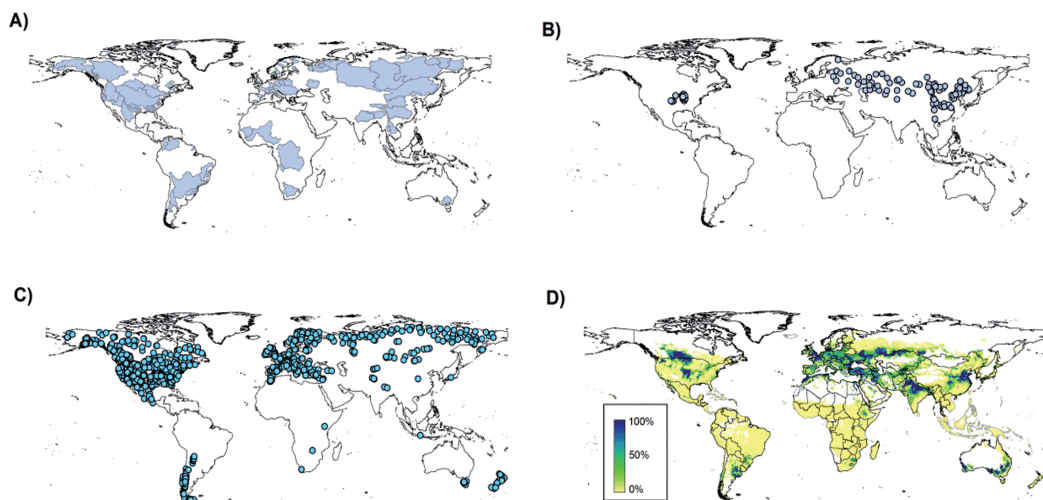


FIG. 1: A) Cuencas con los datos de caudal. B) Series de humedad del suelo. C) Dendrocronologías con al menos 25 años de datos para el período 1945-2009, D) Países con series de producciones de trigo con al menos 10 años de datos para el período 1960-2009 (contorno negro). La escala representa el porcentaje de tierras cultivadas por trigo.

También se utilizaron datos globales de humedad del suelo (<http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu/>). La mayor parte de la serie cubren períodos cortos o tiene lagunas en los datos, así que elegimos las series con un mínimo de 10 años de datos (Figura 1b). La mayoría de las estaciones de humedad del suelo no proporcionan datos para los meses de invierno como consecuencia de la congelación o la saturación del suelo. Por esta razón el análisis se centró en el período comprendido entre abril y octubre. También se compilaron 1840 series de dendrocronologías para el período 1945-2009 (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>) (Figura 1c). Finalmente, se utilizaron datos de

rendimiento de los cultivos de trigo para el período 1960-2009 (FAO, <http://faostat.fao.org>). Se seleccionó el cultivo de trigo porque tiene una amplia distribución en todo el mundo y porque presenta una mayor vulnerabilidad a la sequía que otros cultivos como el arroz o el maíz. Dado que las producciones de trigo muestran una tendencia lineal atribuible a los avances tecnológicos en los sistemas de cultivo, se eliminó la tendencia a las series asumiendo un modelo lineal para la serie de cada país (Lobell *et al.*, 2011).

2.3. Métodos

Por lo general, los distintos sistemas hidrológicos, ecológicos y agrícolas responden a las sequías climáticas a diferentes escalas de tiempo. Por lo tanto, el SPI y el SPEI se calcularon a escalas temporales de 1 a 48 meses. El carácter multiescalar de estos índices es su principal ventaja respecto a otros índices de sequía. Ya que se desconoce a priori los tiempos de respuesta de los diferentes sistemas a la sequía, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre las series temporales de caudales, humedad del suelo, dendrocronologías y producciones de trigo y las series de SPI y SPEI a escalas temporales de 1- a 48-meses, reteniendo la escala temporal con la que se registra una correlación de mayor magnitud. Los diferentes índices de Palmer también se correlacionaron con las series temporales de las diferentes variables. Dichos análisis de correlación se llevaron a cabo mediante series a las que se eliminó previamente su tendencia.

3. RESULTADOS

La figura 2 muestra un diagrama de cajas con las correlaciones obtenidas entre la serie de SSI en 151 cuencas en todo el mundo y los seis índices de sequía. En general, las correlaciones tienden a ser mayores para el SPI y el SPEI que para los diferentes índices de Palmer (PDSI, PHDI, el índice Z y WPLM). La figura 3 muestra la distribución espacial de las correlaciones entre la serie de SSI en las diferentes cuencas y el SPI, SPEI y los dos índices de sequía de Palmer más utilizados. Existen grandes diferencias entre cuencas. En general, e independientemente del índice de sequía utilizado, las correlaciones más fuertes se registran en las cuencas atlánticas de América del Norte, las cuencas de Europa central y en algunas cuencas de América del Sur y África. El análisis estacional de las correlaciones permite observar como las correlaciones resultan mucho más altas en verano (Figura 3c) que en invierno (Figura 3b). Además, se observa que las correlaciones considerando el SPI y el SPEI resultaron más importantes durante los meses de verano, comprobando que el SPEI suele presentar correlaciones más altas que el SPI. La Figura 3d muestra el índice de sequía que presenta una correlación más alta considerando las series continuas de SSI y las series de enero y julio. Para los datos continuos, el SPEI muestra la mayor correlación en el 44.4% de las cuencas, el SPI en el 38.4% y el restante 17.3% uno de los cuatro índices de Palmer (Tabla 1).

En el caso de la humedad del suelo, la correlación más alta se registra con el SPI o el SPEI en un porcentaje de estaciones que oscilan entre el 80% y el 95%, dependiendo del mes, mientras que sólo de un 5 a un 15% se registra la mayor correlación con los índices de Palmer (Tabla 2). Se comprueba cómo en los meses más cálidos (julio, agosto y septiembre) es cuando existe un mayor porcentaje de puntos con una correlación con el SPEI mayor que con el SPI.

La Figura 4 muestra las correlaciones entre las series de ancho de anillos de árboles y los índices de sequía. Existen pocas diferencias en la magnitud de las correlaciones entre el SPI y el SPEI, pero

se observan grandes diferencias con los índices de sequía de Palmer. El SPEI muestra las mayores correlaciones con las series de dendrocronologías en casi el 50% de los bosques (Tabla 3). El SPI muestra la mayor correlación en el 37.9% de los bosques, y solamente en el 13.7% de los bosques la correlación más alta corresponde a alguno de los índices de Palmer.

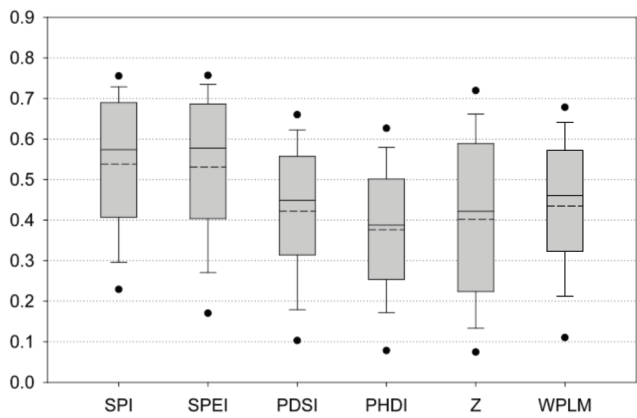


FIG. 2: Diagrama de cajas con las correlaciones entre la serie continua del Índice Estandarizado de caudales (SSI) y los seis índices de sequía en 151 cuencas en todo el mundo.

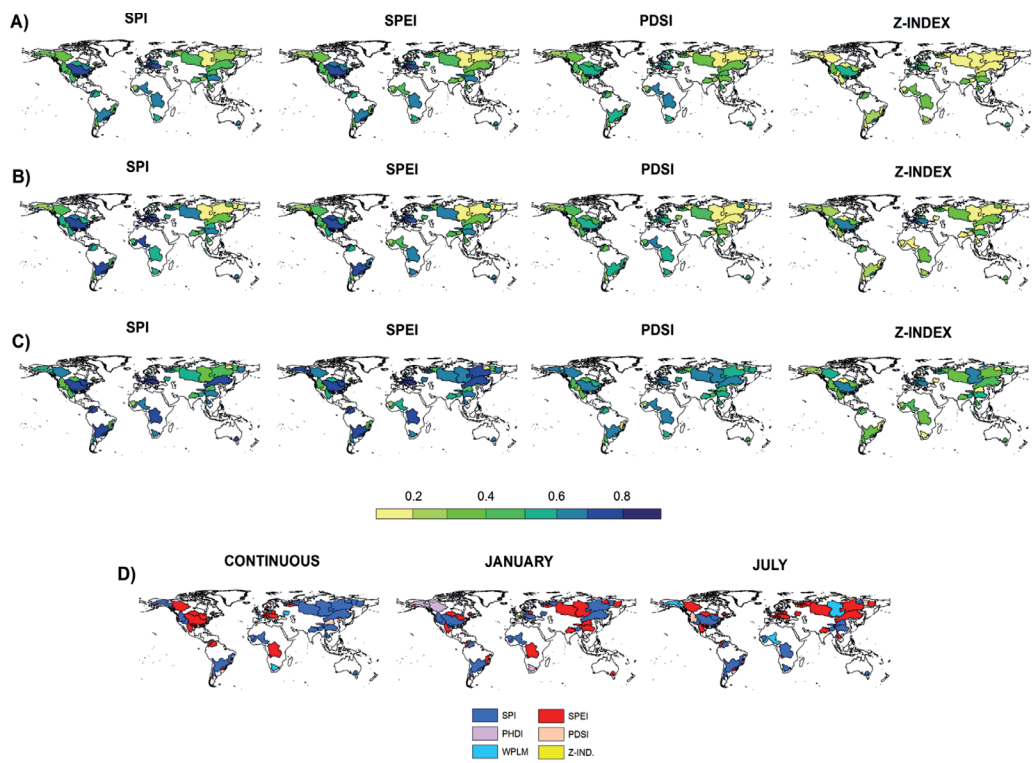


FIG. 3: Distribución espacial de los coeficientes de correlación entre el Índice Estandarizado de caudales (SSI) y el SPI, SPEI, PDSI y el índice Z. A) Correlaciones considerando series continua desde enero de 1948 a septiembre de 2004, B) Serie de enero, C) Serie de julio, D), Índice de sequía que muestra la mayor correlación.

	CONTINUO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
SPI	38.4	49.0	57.6	52.3	48.3	37.1	31.8	33.8	29.8	42.4	57.6	59.6	53.0
SPEI	44.4	33.1	31.1	37.7	40.4	52.3	54.3	47.0	53.0	43.0	31.8	32.5	30.5
PDSI	4.0	0.7	2.0	3.3	3.3	2.0	4.0	4.6	6.0	2.6	1.3	2.6	2.0
PHDI	0.0	2.0	1.3	1.3	2.0	1.3	2.0	2.0	2.0	2.6	0.7	1.3	2.6
Z-Index	7.3	13.9	4.0	4.0	5.3	4.6	5.3	6.0	4.0	5.3	5.3	2.6	10.6
WPLM	6.0	1.3	4.0	1.3	0.7	2.6	2.6	6.6	5.3	4.0	3.3	1.3	1.3

TABLA 1: Porcentaje de las 151 cuencas del mundo con la máxima correlación entre la serie de SSI y los seis índices de sequía.

	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.
SPI	48.3	43.1	44.8	31	31.9	32.8	42.2
SPEI	44.0	46.6	44.8	56	51.7	49.1	44.0
PDSI	4.3	3.4	2.6	6.9	5.2	3.4	3.4
PHDI	0.9	2.6	3.4	0.9	3.4	3.4	2.6
Z	1.7	2.6	2.6	1.7	4.3	6.0	3.4
WPLM	0.9	1.7	1.7	3.4	3.4	5.2	4.3

TABLA 2: Porcentaje de los 117 puntos de muestreo de humedad del suelo considerando la máxima correlación con cada uno de los seis índices de sequía.

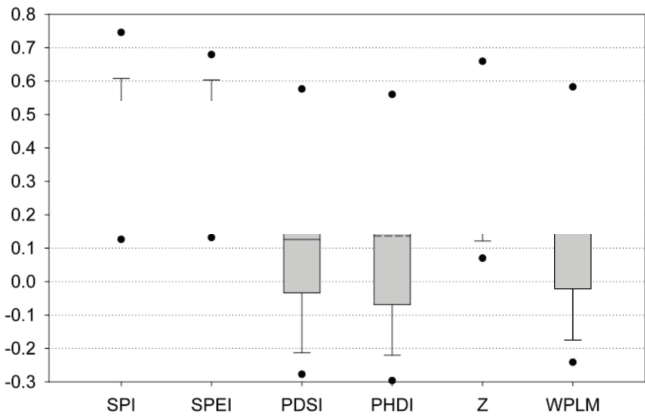


FIG. 4: Diagrama de cajas con los coeficientes de correlación entre las series de dendrocronologías y los seis índices de sequía.

La Figura 5 muestra un resumen de la relación entre los rendimientos mundiales de trigo y los seis índices de sequía. En general, se obtuvieron correlaciones más altas con el SPI y el SPEI que con los diferentes índices de sequía de Palmer. La correlación mediana para el SPI fue de 0.33, para el SPEI de 0.37 y para el índice Z de 0.29. En cualquier caso, cuando los países se clasifican de acuerdo al índice de sequía que presenta la correlación más alta, se comprobó que los rendimientos de trigo de

la mayoría de los países se correlacionan mejor con el SPEI (49.5%) o con el SPI (34.3%). El porcentaje de países en los que se encontró la correlación más alta con uno de los diferentes índices de Palmer es muy bajo (2.9% para el PDSI, 5.7% para el PHDI, 2.9% para el índice Z y 4.8% para el WPLM). Además, con la excepción de Australia y Etiopía, que muestran la mayor correlación con el WPLM, los países que presentan un mayor control de los rendimientos de trigo por la sequía, aquellos caracterizados por cultivos secos en condiciones semiáridas, tienden a tener correlaciones más altas con el SPEI.

	MAXIMO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
SPI	37.9	37.3	38.2	41.1	41.1	43.4	43.5	43.3	43.2	40.9	41.9	40.0	42.1
SPEI	48.5	48.4	49.3	46.3	46.8	45.2	46.6	47.3	48.5	49.5	49.9	49.9	49.8
PDSI	2.1	5.7	4.0	4.5	4.5	4.3	2.7	2.4	2.2	2.2	1.7	2.1	2.3
PHDI	2.2	4.5	3.4	3.5	3.4	3.6	3.4	3.9	3.3	3.9	3.5	2.8	3.0
Z	7.0	3.0	3.9	3.3	2.2	2.1	2.2	1.8	1.5	2.1	1.6	4.0	1.4
WPLM	2.4	1.1	1.4	1.3	2.0	1.5	1.6	1.3	1.3	1.5	1.4	1.3	1.3

TABLA 3: Porcentaje de los 1840 bosques con la máxima correlación entre la serie de dendrocronologías y los seis índices de sequía.

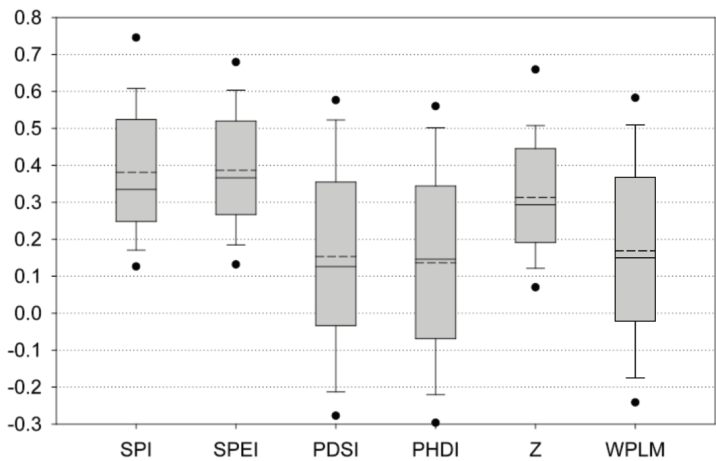


FIG. 5: Diagrama de cajas con los coeficientes de correlación entre las series de cultivo de trigo y los seis índices de sequía.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este estudio se ha llevado a cabo una evaluación global de diferentes índices de sequía para la detección de impactos en sistemas hidrológicos, ecológicos y agrícolas. Hay que destacar la dificultad de desarrollar este tipo de estudios basados en información empírica debido a los problemas existentes para cuantificar los daños relacionados con la severidad de las sequías en diferentes sistemas. Además, el carácter global del estudio introduce otro punto de complejidad, dadas las variadas fuentes de información utilizadas.

Independientemente del sistema analizado (hidrológico, agrícola o ecológico), se ha comprobado una mayor capacidad de los índices de sequía que pueden calcularse a diferentes escalas de tiempo (SPEI y SPI), pues se correlacionan mejor con la variabilidad temporal de las diferentes variables. Los índices de Palmer, carecen de la flexibilidad para reflejar la naturaleza multi-escalar de las sequías. Las magnitudes de correlación entre las diferentes variables hidrológicas, agrícolas y ecológicas analizadas en este estudio muestran claramente que el SPI y el SPEI muestran una mayor capacidad para el seguimiento de las condiciones de sequía en una gran variedad de sistemas.

La correlación más alta se produce entre el 70-95% de los casos con el SPI o EL SPEI, en función de la variable, y la estación del año, mientras que los índices de sequía de Palmer representan menos del 15% de las máximas correlaciones. En general, se han encontrado pequeñas diferencias en los resultados considerando el SPI y el SPEI. La magnitud de las correlaciones en muchas de las variables analizadas es similar entre los dos índices. Este resultado podría sugerir el uso del SPI, pues requiere de menos datos que el SPEI. Sin embargo, se han encontrado algunas diferencias entre ambos índices que sugieren la mejor capacidad del SPEI frente al SPI: i) con independencia de la variable de interés, el SPEI tiende a obtener mayores correlaciones que el SPI. La diferencia en el porcentaje de correlaciones máximas entre SPI y SPEI es de aproximadamente EL 10% superior para el SPEI que para el SPI en los diferentes sistemas analizados. ii) Las diferencias entre la magnitud de las correlaciones encontradas tienden a ser mayores en el verano boreal, que representa la temporada en la que las muestras de humedad del suelo y los bosques se ven afectados por la sequía en la mayoría de las cuencas hidrográficas disponibles, ubicadas en el hemisferio norte. La demanda de agua por la atmósfera es mayor en los meses de verano que en otras estaciones del año debido al incremento de la radiación solar y la temperatura. Por esta razón, en la estación del año en la que se registran mayores impactos asociados a la sequía (restricciones de abastecimiento de agua, reducción de crecimiento de los árboles, incendios forestales, etc.) y en la que la monitorización de la sequía resulta más importante, el SPEI muestra una mejor capacidad para identificar los impactos de la sequía que el SPI. Estos resultados demuestran claramente que, aunque la precipitación es el principal determinante de la severidad de la sequía, la influencia de la demanda evaporativa no se puede obviar, sobre todo en el escenario actual de calentamiento global.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los impactos observados por el proceso de calentamiento global sobre la disponibilidad de agua y sobre los sistemas agrícolas, ecológicos e hidrológicos, el futuro aumento de las temperaturas (Solomon et al., 2007), y los resultados obtenidos en este estudio basado en la comparación objetiva de diferentes índices de sequía, parece razonable recomendar el uso del SPEI para la monitorización de las condiciones de sequía a escala global.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación, CGL2011-27574-CO2-02, CGL2011-24185 y CGL2011-27536 financiados por la Comisión Española de Ciencia y Tecnología y FEDER, ACQWA (FP7-ENV-2007-1-212250) financiado por el VII Programa Marco de la Comisión Europea, “Efecto de los Escenarios de Cambio Climático Sobre La Hidrología superficial y la Gestión de Embalses del Pirineo Aragonés”, financiado por “la Obra Social La Caixa” y el Gobierno de Aragón y la Influencia del Cambio Climático en el turismo de nieve, CTP01/10, financiado por la Comisión de trabajo de los Pirineos. JJC agradece el apoyo de ARAID.

REFERENCIAS

Anderson, M.C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J.R., Kustas, W.P., (2011): Evaluation of drought indices based on Thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States. *Journal of Climate*, 24: 2025-2044.

- Akinremi, O.O., McGinn, S.M., Barr, A.G., (1996): Evaluation of the Palmer Drought index on the Canadian prairies. *Journal of Climate*, 9: 897-905.
- Burton, I., R.W. Kates, and G.F. White, (1978): *The environment as hazard*. Oxford University Press. Nueva York, 240 pp.
- Dai, A., T. Qian, K. E. Trenberth, and J. D Milliman, (2009): Changes in continental freshwater discharge from 1948-2004. *J. Climate*, 22: 2773-2791.
- Drobyshev, I., Niklasson, M., Linderholm, H.W. (2012): Agricultural Forest fire activity in Sweden: Climatic controls and geographical patterns in 20th century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154-155: 174-186
- Edwards, D.C. and McKee, T.B., (1997): Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Atmospheric Science Paper No.* 634.
- Guttman, N.B., (1998): Comparing the Palmer drought index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 113-121.
- Heddinghaus, T. R. and P. Sabol, (1991). A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here? In: *Proc. 7th Conf. on Applied Climatology*, September 10-13, 1991. American Meteorological Society, Boston, pp. 242-246.
- Heim, R.R., (2002): A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1149-1165.
- Karl, T.R., (1986): The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and the Palmer z-Index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25, 77-86.
- Lobell, D. A., Schlenker, W., Costa-Roberts. (2011): Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, DOI:10.1126/science.1204531
- McKee, T.B.N., J. Doesken, and J. Kleist, (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conf. On Applied Climatology*. Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. 179-184.
- Mishra, A. K., and V. P. Singh (2010), A review of drought concepts, *J. Hydrol.*, 391, 202–216.
- Palmer, W.C., (1965): *Meteorological droughts*. U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45, 58 pp.
- Pasho, E., J. Julio Camarero, Martín de Luis and Vicente-Serrano, S.M. (2011) Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151: 1800-1811.
- Quiring, S.M. (2009): Developing objective operational definitions for monitoring drought. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48: 1217-1229
- Solomon, S. et al. (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D. and Stephens, S., (2002): The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83: 1181-1190.
- Vicente-Serrano, S.M. and López-Moreno, J.I., (2005), Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 9: 523-533.
- Vicente-Serrano, S.M., (2006), Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management* 20: 37-60.
- Vicente-Serrano, S.M., Cuadrat, J.M. and Romo, A., (2006), Early prediction of crop productions using drought indices at different time scales and remote sensing data: application in the Ebro valley (North-east Spain). *International Journal of Remote Sensing* 27: 511-518.
- Vicente-Serrano, S.M. (2007), Evaluating The Impact Of Drought Using Remote Sensing In A Mediterranean, Semi-Arid Region, *Natural Hazards*, 40: 173-208.

- Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, (2010) A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate* 23: 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., Gracia, C., (2010b): Aridification determines changes in leaf activity in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 614-628.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and Juan I. López-Moreno (2011). Comment on “Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900-2008” by A. Dai. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*. 116, D19112, doi:10.1029/2011JD016410
- Vicente-Serrano, S.M., Juan I. López-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Cesar Azorin-Molina and Enrique Morán-Tejeda, (2012): Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering* doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433
- Wells, N., S. Goddard, and M.J. Hayes, (2004): A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, 17, 2335-2351.
- Wilhite, D.A., (1993): Drought assessment, management and planning: Theory and case studies. Kluwer. Boston.
- Wilhite, D.A., (2000): Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In *Drought: a global assessment*. (D. Wilhite ed.). Vol 1: 3-18.
- Zhai, J., Su, B., Krysanova, V., Vetter, T., Gao, C., Jiang, T. (2010): Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in 10 large regions of china *Journal of Climate* 23: 649-663.

